

CCD撮像素子による干渉縞を利用した 簡易ひずみ分布測定システムの開発

本郷 宏通*・升田 博之*・門馬 義雄*

Development of Simple Strain Distribution Measurement System by Interferometry Using CCD Image Elements

Hiromichi HONGO, Hiroyuki MASUDA and Yoshio MONMA

Synopsis : A simple measurement system for strain distribution has been developed on the basis of moiré interferometry using CCD camera. A direct image of moiré fringe can be obtained from the grid on surface of a plate specimen. After simply preprocessing the image, the system allows us to get the strain distribution in a few seconds. This paper describes the application of the system to large plate specimens by creep testing. The interference fringe generated by a CCD image agrees with the conventional moiré fringe. Thus we can apply the system to measure the strain distribution of interrupted creep specimens. Since the system uses the simple configuration of a CCD camera and a personal computer for gridded specimens, little skill is needed to apply it. When the surface conditions are not smooth enough, a simplified smoothing treatment helps us to improve the accuracy of strain measurement. The range of measurement can be localized by the zooming function of the camera. Another feature of the new method is that it can be used in nearly real-time situation.

Key words : moiré interferometry ; image processing ; strain distribution ; creep ; CCD camera.

1. 緒言

クリープ変形が無視できない温度領域で使用する高温構造機器，例えば高速増殖炉容器，の設計基準においてはクリープ変形を考慮した「解析による設計(design by analysis)」が要求されている。これらの高温構造物がクリープ荷重下にあるときは一般に，応力及びひずみの時間と共に変化する分布を把握することが，構造健全性を保証する上で非常に重要と考えられている。実験的にひずみ分布を測定する方法としては，格子法やモアレ干渉縞による解析^{1)~3)}がよく用いられている。著者らは，溶接継手のクリープ変形挙動について，有限要素法(FEM)によるひずみ分布の計算結果を，実際のクリープ試験を行い，投影機を用いて干渉縞を発生させる従来のモアレ法によりひずみ分布データを取得した結果と比較をしている⁴⁾。この取得したひずみ分布データは，クリープ中断材についてのものであるため，中断間隔も制限され取得できるデータも少ない。そこで，クリープ試験中の試料に対して，試験を中断しない連続的な「その場」測定が可能となれば，データの大量取得への道が開けることになる。しかし，従来のモアレ法では，試料表面に作った格子と基準格子とを重ね合わせて干渉縞を発生させるので，変形量が一定の範囲を越えると干渉縞が発生しなくなり，任意のひずみ分布に対して干渉縞を発生させるにはひずみレベルごとに基準格子を置き換える必要

がある。また，ひずみ分布図の作成までには多くの労力と時間を必要とした。さらに，干渉縞の解析に際しては，得られた縞の中心位置の決定や，縞間隔の測定などに解析者の主観が入りがちで，常に十分な精度を確保できるとは言えなかった。最近では，処理能力の向上したパーソナルコンピュータ(PC)と安価な画像メモリの出現により，格子イメージを取り込んで特殊な画像処理により干渉縞を発生させ，ひずみ分布を算出する方法⁵⁾⁶⁾などが開発されている。これらの手法は，基準格子に関係なく干渉縞が得られ，ひずみの解析もかなり精度良く行えるのが特徴である。しかし，これらの手法では干渉縞を発生させる過程で2次元FFT(高速フーリエ変換)などの数値計算を必要とし，ひずみ解析も複雑である。そこで，クリープ試験を中断することなくひずみ分布データを取得することを目的として，CCDカメラの特性を活用し，試料表面に作った格子を撮影することにより干渉縞を発生させ，ひずみ分布図をFFT解析なしに求められる簡易ひずみ測定システムの開発を試みた。本報告は，CCDカメラの画像を用いてクリープのひずみ分布の計測に適用できるかどうかを検討したものである。

2. 測定原理

2・1 CCD撮像素子の座標による干渉縞の発生

CCDカメラは，CCD(Charge Coupled Device)と呼ば

れる電荷移送素子を画素間隔約20~30 μm で縦横に規則正しく配列したものである。また、得られた電気信号を画像入力データとして取り扱える機能⁷⁾や CCD 素子自身による標本化などの機能を持っており、画像処理の入力部として広く用いられている。しかし、格子画像に対しては、CCD カメラの取り込み段階において、標本化機能により歓迎されない干渉縞が発生することが頻繁に認められる。本方法では、この歓迎されない現象を積極的に活用し、走査線のピッチと格子のピッチとが近い範囲で発生する干渉縞を用いて、ひずみ解析を行うものである。Photo. 1 はモアレ干渉縞の発生をシミュレーションしたものである。Photo. 1 (a) は原画像で水平方向は512画素からなり、格子のピッチが約6.4画素に対応している。いま1つの CCD 素子が水平方向に5画素分、垂直方向に1画素分の濃淡を平均化した情報をもつとして像を作成したものが Photo. 1 (b) で、格子のピッチと CCD 素子の情報範囲が近い水平方向にモアレ干渉縞が発生しているのがわかる。本システムはこのような原理で CCD 素子自身の標本化機能により発生した干渉縞のアナログデータをデジタル信号として画像メモリボードに取り込み解析して、ひずみ分布図を作成するものである。

2.2 ひずみ計算

CCD カメラにより発生するモアレ干渉には1つの CCD 素子が感知する画像情報範囲が格子のピッチより大きい場合と小さい場合が考えられる。前者の条件で発生するモアレ干渉縞を負モアレ縞、後者の条件で発生するモアレ干渉縞を正モアレ縞と呼ぶこととする。干渉縞の間隔は従来のモアレ干渉縞と同様に、正モアレはひずみが大きいほどモアレ縞間隔が小さくなる。また、負モアレはひずみが大きいほどモアレ縞間隔が大きくなる性質を持つ。

モアレ干渉縞の間隔とひずみ量の関係は以下のように関係づけられる。画像メモリボード512画素に対応する無変形時の格子の本数を P_f 、ひずみ量 ε のときの格子の本数 P_s とすると試料表面の格子と垂直方向の CCD カメラの走査線が平行な場合には P_s は次式(1)で表わせる。

$$P_s = \frac{P_f}{(1+\varepsilon)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、CCD カメラの垂直方向の走査線本数を P_c 、無変形時のモアレ干渉縞の間隔を δ_0 、ひずみ量 ε のときのモアレ干渉縞の間隔を δ_1 とすると、正のモアレ干渉縞の現れる範囲 $P_c > P_s$ のとき δ_0, δ_1 はそれぞれ式(2), (3)のようになる。

$$\delta_0 = \frac{512}{(P_c - P_f)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\delta_1 = \frac{512}{(P_c - P_s)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

従ってひずみ量 ε は式(1)に式(2), (3)を代入して得られる式(4)で求めることができる。

$$\frac{\varepsilon}{(1+\varepsilon)} = \frac{512(1/\delta_1 - 1/\delta_0)}{P_f} \quad \dots\dots\dots (4)$$

同様に、負のモアレ干渉縞が現れる範囲 $P_c < P_s$ のとき δ_0, δ_1 及び ε は式(5), (6), (7)で与えられる。

$$\delta_0 = -\frac{512}{(P_c - P_f)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\delta_1 = -\frac{512}{(P_c - P_s)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\varepsilon}{(1+\varepsilon)} = -\frac{512(1/\delta_1 - 1/\delta_0)}{P_f} \quad \dots\dots\dots (7)$$

本方法では、式(4)及び(7)でわかるように、無変形時のモアレ間隔の設定により、測定者のニーズに合わせて精度良くひずみ分布を計測することが可能である。

3. 実験方法

3.1 測定システム

本研究で用いた画像処理システム全体の機器の構成を Fig. 1 に示す。画像入力装置は CCD カメラを用い、処理を高速で、かつ簡単に行うため CCD カメラの出力を512 $\times$ 512画素、色調が256階調の画像メモリボードに取り込んだ。また、取り込んだ画像の解析には汎用の16ビットのパーソナルコンピュータを用いた。なお、使用した CCD カメラはズームレ

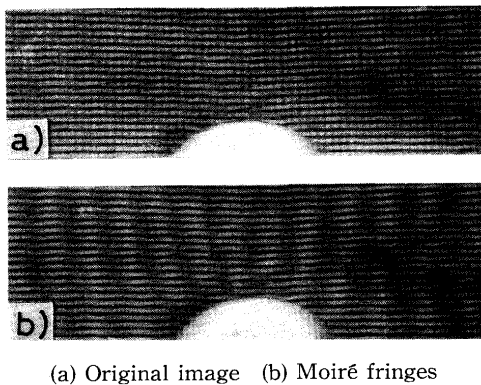


Photo. 1. Simulation of moiré fringe by CCD camera.

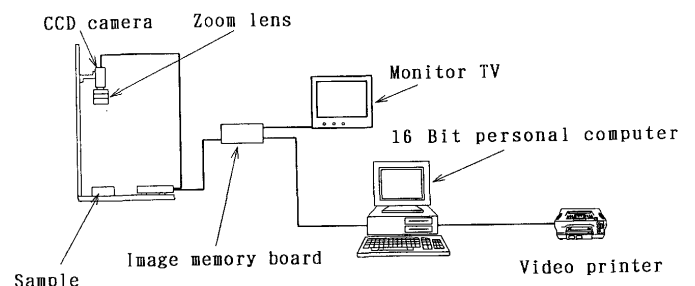


Fig. 1. Setup of image processing system.

レンズにより1つのCCD素子が感知する画像情報範囲を変えられるようになっている。画像データの取り込みからひずみ分布の算出までの時間をなるべく高速で行うため、計算プログラムには低レベル言語のアセンブラを用いた。その結果データ取り込みからひずみ分布表示まで数秒でできるようにした。

3・2 モアレ干渉縞の解析

干渉縞の実験は次の4項目について行った。まず、1インチ50本のモデルグリッドを用いてモアレ干渉縞の間隔と画像メモリボードの512画素に対応するグリッドの本数 P_f の関係を調べた。

次に、不均一変形におけるモアレ干渉縞の最適な平均化処理方法を見いだすため、中央に直径10mmの孔を開けた板厚2mm、長さ250mm、幅30mmのSUS 304鋼板の試料表面に1インチ50本の格子を食刻した試験片を全ひずみで2%変形させた試料を用意した。

また、本システムの分解能を無変形の試験片を用いて調べた。

さらに、実際の試験片への適用例として、同じく1インチ50本の格子を食刻した厚さ10mm、幅50mm、平行部180mmの304鋼大形クリープ試験片を用い、550°C、235MPaの条件でクリープ試験を行い0.1及び400hで中断して、その試料のひずみ分布を求めた。なお、大形クリープ試験片には、高温においても安定な格子を得るために、格子を食刻した後、試料表面にクロムメッキを施した。

4. 実験結果及び考察

4・1 基準格子によるモアレ干渉縞の発生

1インチ50本のモデルグリッドについて、CCDカメラの倍率を変え、画像ボード512画素に対応するモデルグリッドの本数 P_f を変化させたときに、CCDカメラの走査線との干渉により発生する縞の例をFig. 2に示す。画像ボード512画素に対応する、モデルグリッドの本数 P_f が、CCDカメラの垂直方向の走査線本数 P_c と同じとき ($P_c = P_f$)、干渉縞は発生しない。本システムでは、干渉縞が発生しなくなったときの格子の本数 P_f は398本であった。なお、干渉縞の間隔は P_f と P_c の差が大きいほど小さくなっている。

またFig. 3に、ズームレンズの倍率を変化させ512画素に対応する各格子の本数と、実測のモアレ干渉縞の間隔 δ_0 の関係を示す。なお、本実験では縞模様として認識でき、前述の解析式(2)及び(5)に一致する干渉縞が発生する格子範囲は256～531本の範囲であった。フーリエ変換を用いたモアレ法によるひずみ解析⁵⁾では、格子画像に対して、画像処理を行い干渉縞を発生させている。本システムではFig. 2に示すような画像取り込み時に発生した干渉縞を用いるため、画像処理により干渉縞を発生させる過程を省略できる特徴がある。格子の本数が256及び531本のとき発生した干

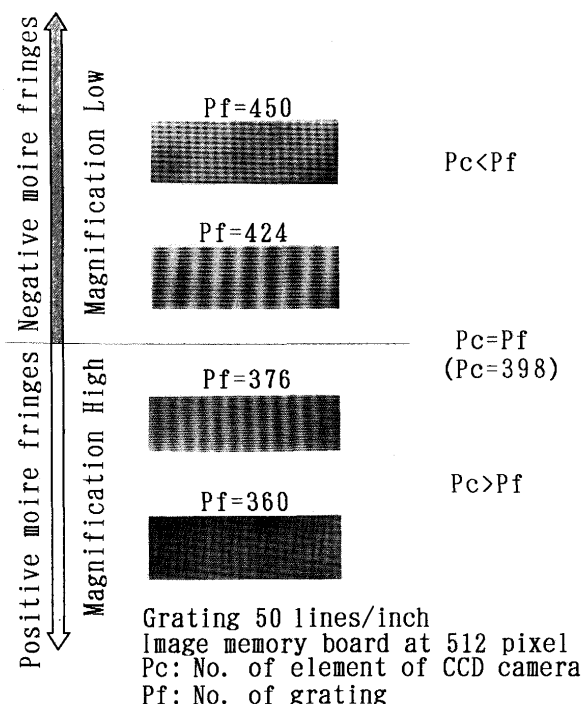


Fig. 2. Comparison of moiré fringes by CCD camera for various magnification.

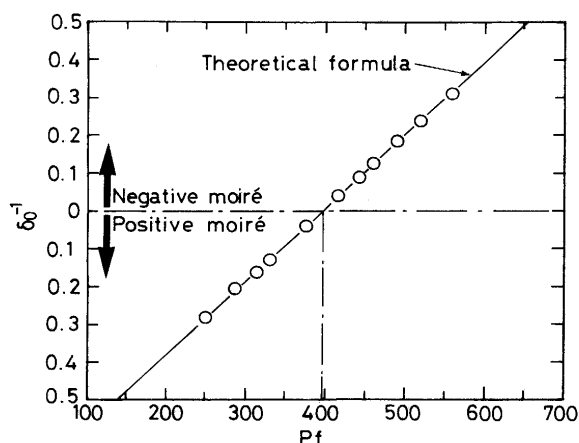
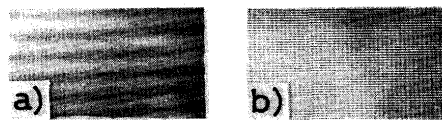


Fig. 3. Relation between scanning line number of vertical direction and spacing between moiré fringes.

渉縞をPhoto. 2に示す。干渉縞が発生する格子本数の範囲(256～531)は、無変形時の干渉縞間隔を100画素に設定した場合、ひずみ量に換算すると約53～24%の範囲である。一方、SUS 304鋼の550°Cにおけるクリープ破断伸びは40%以下⁸⁾である。また、高温構造物の設計基準のASME Boiler & Pressure Vessel Code, Case N-47⁹⁾では304ステンレス鋼の局部変形量を母材部で最大10%、溶接部は5%以下としている。本手法で得られる最大ひずみ量はこれらの量を十分上回っている。なお、従来から行われている投影機により干渉縞を発生させる手法では、レンズ倍率10倍の投影機を用いて干渉縞を発生させひずみ測定する場合、0～50%のひずみを干渉縞のピッチ5～50mmで測定するとき6枚



(a) Using grid of 256 (b) Using grid of 531

Photo. 2. Appearance to extent of moiré fringes.

のマスターグリッドを用いなければならない。しかし、本報告で提案したシステムは、広いひずみ範囲を倍率を変化させるだけで簡単に測定できる。

4・2 画像の平均化処理

CCD カメラの走査線と試料表面の格子との干渉により発生した干渉縞を取り込んだ画像データは、しばしば照明むらによるバックグラウンドや試料表面の汚れなどで濃淡が一樣ではない。このため、モアレ干渉縞以外の画像情報についてのノイズ除去処理が必要である。しかし、モアレ干渉縞の単純な2値化処理や通常行われているノイズ除去処理¹⁰⁾などを行うと情報の欠落が著しい。そこで、今回用いたノイズ除去処理は、X軸方向の平均的モアレ干渉縞間隔に対応する画素数 n (n は奇数) で順次平均化したものを、約 $n/3$ 点平均したデータから差し引くというものである。またモアレ干渉縞の線が色むらなどのために連続していない場合は、連続させることを目的とし、予め Y 軸方向にできるだけ少ない点数 m で平均化処理した後に、X 軸方向の平均化処理を行った。

SUS 304 鋼板の中央に穴をあけ、表面に 1 インチ 50 本の格子を食刻した試験片を全ひずみで 2 % 変形させた試験片の



Photo. 3. Profile of test specimen.

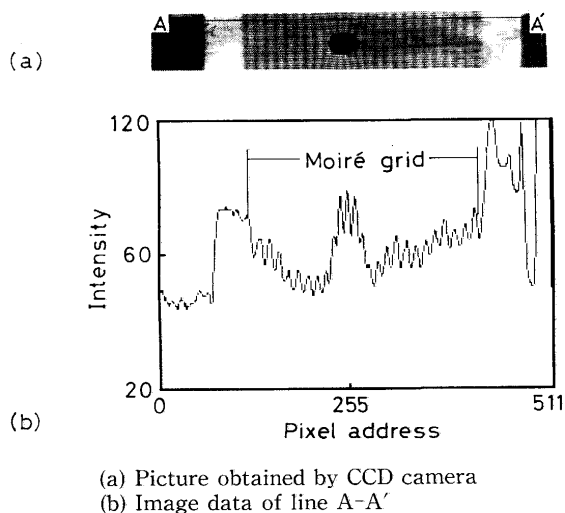


Fig. 4. Example of moiré fringes appeared on strained specimen by CCD moiré method.

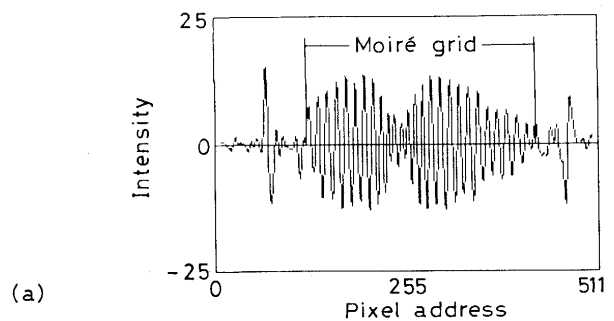


Fig. 5. Example of smoothing-treated data.

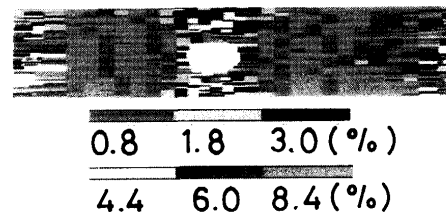


Photo. 4. Strain distribution around circular hole.

外観を Photo. 3 に示す。この試験片を CCD カメラで撮影すると Fig. 4 (a) に示すモアレ干渉縞が発生する。また、そのときの A-A' 上の各画素の濃度分布を Fig. 4 (b) に示す。このように、モアレ画像には微少なノイズばかりでなく大きなノイズも重なっている。これらのノイズを取るため、前述の平均化処理を行った。なお、干渉縞のピッチがほぼ 12 画素であったため、3 点平均から 13 点平均を引く平均化処理を用いた。そのときの濃度分布を Fig. 5 (a) に示す。小さな周波数成分が除去されていることがわかる。3 点平均から 13 点平均を引き、ゼロ点を境に 2 値化した画像を Fig. 5 (b) に示す。このデータの 1 サイクルを干渉縞の間隔とし、ゼロ点に接する 1 周期分のメモリボードの画素数を求め、前に示した計算式に代入して得られたひずみデータを、8 色カラーグラフィックス機能により可視化したひずみ分布図の例を Photo. 4 に示す。切欠きの周辺に、3 ~ 4.4 % の大きなひずみが集中し、切欠き部分から離れたところでは、ほとんど変形していないことがわかる。このように、発生した干渉縞に対して簡易的な平均化処理を用いることによりノイズが除去され、精度の良いひずみ分布図が得られる。

4・3 分解能

ひずみ計測のとき問題となるのが分解能である。本システムにおいて分解能はノイズ、レンズのひずみ等に依存す

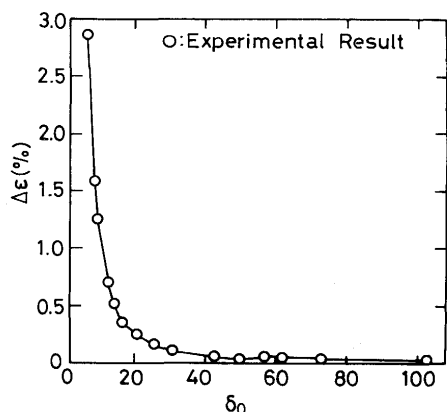


Fig. 6. Relation between pitch of moiré fringes δ_0 and strain accuracy $\Delta\epsilon$.

る。そこで無変形の試験片を用いて干渉縞の間隔 δ_0 (画素数) とひずみ精度 $\Delta\epsilon$ (=分解能) の関係について求めた。Fig. 6で示すように、ひずみの精度は干渉縞の間隔、すなわち画素数が多くなるほど良くなり、干渉縞の間隔が30画素以上になるように倍率を設定すれば、ひずみ精度は $\pm 0.1\%$ 以内であることがわかる。

4・4 クリープ試験片への適用

Photo. 5 (a) ~ (b) に1インチ50本の格子を食刻した304鋼大形クリープ試験片の、無変形のときの干渉縞と、それを平均化処理した画像及びひずみ分布図を示す。ひずみがほぼゼロに対応していることがわかる。

この試験片を、550°C、235MPaの条件でクリープ試験を行い0.1hで中断したときの干渉縞と、それを平均化処理した画像及びひずみ分布図を Photo.6 (a) ~ (c) に示す。なお、格子を食刻した範囲を標点距離として、測長器で測定し

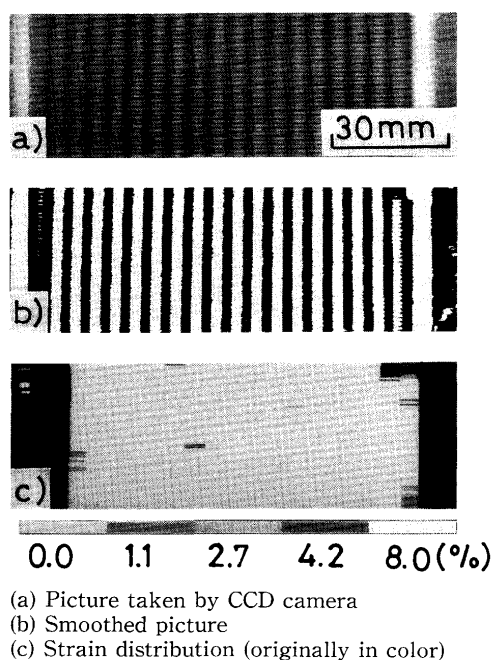


Photo. 5. Example of zero strain specimen.

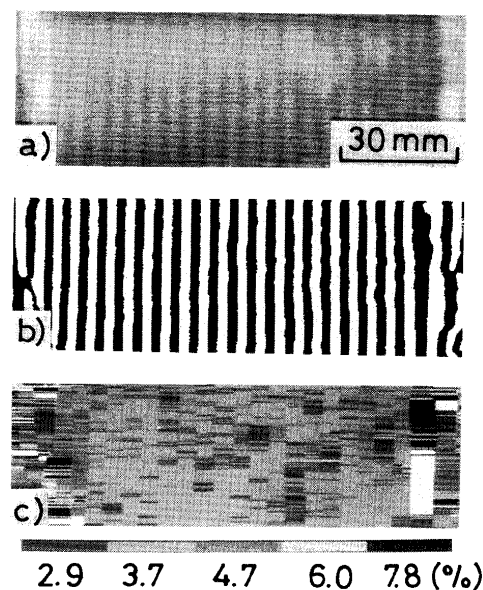


Photo. 6. Example of strain distribution for creep specimen (550°C, 235MPa and 0.1h).

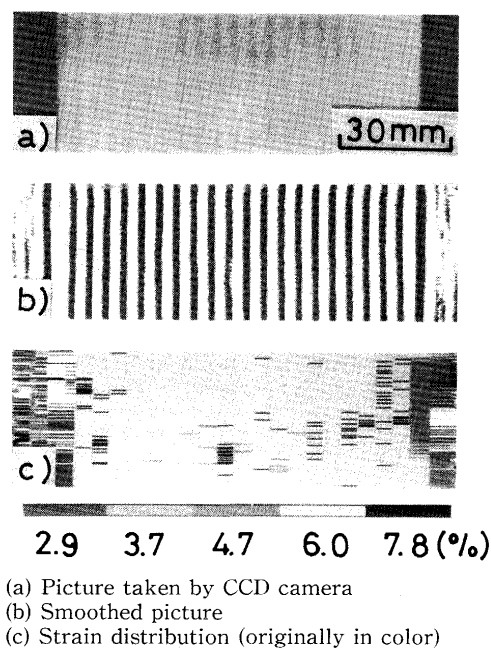


Photo. 7. Example of strain distribution for creep specimen (550°C, 235MPa and 400h).

た平均ひずみは4.07%であった。CCD モアレ法で測定したひずみは、3.7~4.7%の範囲でほぼ一様に分布し、測長器で測定したひずみと対応している。また、同じ試験条件で400h中断材について解析した結果をPhoto. 7 (a) ~ (c) に示す。試料の平均ひずみは約6%であり、本システムによる解析結果とよく一致している。一般にクリープ試験片は高温にさらされ、表面状態が悪くきれいな干渉縞を発生させることは困難である。しかし本システムでは適切なノイズ除去を行うことにより、簡便にひずみ分布測定ができる。

5. 結言

CCD 撮像素子の画像座標を用いて干渉縞を発生させパーソナルコンピュータにより解析する、簡易ひずみ測定システムによるひずみ分布測定方法を開発した。この方法がクリープひずみ計測に適用できるかどうかについて検討した結果、以下のことが明らかになった。

1) 本システムにより、ひずみ解析できる範囲は、53～24%である。

2) ズーム機能により、測定者のニーズに合わせて干渉縞の間隔を任意に変えて測定できる。

3) 簡易的な平均化処理を用いて、表面状態のあまり良くない試料についても解析できる。

4) 本システムの分解能は干渉縞間隔を30画素以上に設定すれば、 $\pm 0.1\%$ 以内である。

5) 550°C, 400h クリープした304ステンレス鋼についても

十分な精度でひずみ測定できる。

6) デジタル解析及びリアルタイムなひずみ計測を非常に簡単に行うことができる。

文 献

- 1) B. M. Shepard and R. Weller: Proc. Soc. for Experimental Stress Analysis, **6** (1948), p. 35
- 2) A. Vinckier and R. Dechaene: Trans. ASME, J. Basic Engir, **6** (1960), p. 426
- 3) 猪狩敏秀, 浜上義行, 中野庄喜, 瀬戸口克哉, 野村真一: 非破壊検査, **35** (1986), p. 333
- 4) 衣川純一, 村松由樹, 門馬義雄, 山崎政義, 本郷宏通, 渡部 隆: 溶接学会論文集, **7** (1989), p. 117
- 5) 森本吉春, 林 卓夫, 山口典之: 日本機械学会論文集, **50** (1984), p. 489
- 6) 森本吉春, 瀬口靖幸, 東 利彦: 日本機械学会論文集, **54** (1988), p. 504
- 7) 尾上守夫: 画像処理ハンドブック, (1987), p. 85 [昭晃堂]
- 8) NRIM Creep Data Sheet No. 32, (1982)
- 9) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Case N-47-28, (1989)
- 10) 瀬口靖幸: 材料, **35** (1986), p. 389